

ESWL 장치에 의한 방사음 및 파쇄효율에 미치는 캐비테이션의 영향

장 윤 석

부경대학교 공과대학 전기공학과
(2000년 3월 22일 접수, 2001년 2월 24일 채택)

Cavitation Effects on Radiated Sounds and Break Efficiency Induced by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter

Y.S. Jang

Department of Electrical Engineering, Pukyong National University

(Received March 22, 2000. Accepted February 24, 2001)

요약: 결석 파쇄에 ESWL 장치가 이용되기 시작한 이래, 장치의 성능 및 장치에서 발생시킨 충격파가 생체에 미치는 영향등에 관한 연구가 다수 행해지고 있다. 그 중의 하나가 충격파가 전달되는 곳에는 항상 거론되는 캐비테이션 문제이다. 본 연구에서는 압전식 ESWL 장치로 대상물을 파쇄한다는 가정하에, 그 때의 매질을 캐비테이션이 미치는 영향과 관련지어 둘로 구분한다. 그것에 따라 각 매질에서의 방사음을 관측하고, 매질에 따른 파쇄효율과의 관계를 분석한 결과를 제시한다. 본 논문의 결과들은 캐비테이션 기포의 발생율이 작은 탈기수족이 방사음에 있어서도 분산성이 작고, 파쇄효율면에 있어서도 안정된 점을 확실하게 나타내고 있다.

Abstract: The effectiveness of extracorporeal shock wave lithotripter for the therapy of calculus has been well known in the field of urology. There are many studies about the performance of that and the influence into human body. Among them, it is an important issue that cavitation is always deal with shock wave. A medium of the shock wave is related to the cavitation phenomenon. In this paper, therefore, we analysis the spectra of radiated sounds and the break efficiency on focal region due to the medium of shock wave. The results show that the cavitation bubbles produce a harmful effect on the break efficiency and the stability of the radiated sounds due to the ESWL.

Key words: ESWL 장치(extracorporeal shock wave lithotripter), 결석(calculus), 캐비테이션 기포(cavitation bubble), 압전식(piezoelectric), 탈기수(degassed water), 부분파워(partial power), 방사음(radiated sound), 파쇄효율(break efficiency)

서 론

비뇨기과 영역에서 결석치료 수술에 가장 많이 쓰이는 의료 장비로서 ESWL 장치를 들 수 있는 데, 이것은 ESWL 장치의 사용이 비관혈적(非觀血的) 방법이라는 데 기인하는 사실이다. ESWL, 장치에도 여러 가지 종류가 있으며[1-3], 전술한 바와 같은 편의성을 감안하더라도 아직 개선되어야 할 문제점을 가지고 있는 것도 사실이다. 그런 점을 고려하여 ESWL 장치의 새로운 기능 개발, ESWL 장치 사용의 안전성 및 기준

장치의 최적 활용법 등 현재 여러 가지면으로 효용성있는 장치의 개발을 위한 기초적 연구가 행해지고 있다[4, 5].

그 중 하나의 문제점으로 거론되는 것이 ESWL 장치에 의한 충격파와 관련된 캐비테이션(cavitation) 현상이다[6-13]. 캐비테이션 현상은 항상 충격파와 같이 거론되고 있는 중요한 문제로서, 많은 연구들이 행해지고 있다. 그 중, ESWL 장치와 관련된 캐비테이션 현상에 관한 연구를 몇가지 소개하면, Williams등은 ESWL 장치를 사용할 때, 혈액등 유체중의 캐비테이션 생성과정에 대하여 연구 발표한 바가 있고[6]. Holmer등은 ESWL 장치에 의한 파쇄과정의 메카니즘에 관한 연구에서, ESWL 장치에 의한 순간적인(transient) 캐비테이션에 대하여 설명하였다[13]. 또한, Tomita, Obara등은 캐비테이션 현상이 생체에 손상을 입히게 될 가능성에 대한 연구결과를 발표하였다[12].

전술한 바와 같이 여러 가지 연구결과에서, ESWL 장치로

이 논문은 1999년도 부경대 학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.

통신저자: 장윤석, (608-739) 부산광역시 남구 용당동 산 100
부경대학교 공과대학 전기공학과
Tel. (051) 620-1422, Fax. (051) 620-1426
E-mail. jangys@dolphin.pknu.ac.kr

충격파를 조사할 때, 초점부근에 발생하는 캐비테이션 기포는 장치의 파쇄능력에 영향을 미칠 수도 있고, 생체에의 영향 즉, 생체조직에 손상을 입힐 가능성도 있다는 점을 분명히 지적하고 있다[12]. 이런 점을 감안하면, 이미 매질 내에 존재하고 있거나, ESWL 장치를 사용함으로써 발생하는 기포와 충격파와의 관계를 여러 가지 방향에서 분석할 필요가 있다고 생각된다.

본 연구에서는 먼저 충격파를 조사할 때 발생하는 방사음을 비교 분석하는 방법을 사용하여, 캐비테이션 기포의 발생이 방사음에 미치는 영향을 실험적으로 조사한다. 또한, 지금까지의 연구결과에서도 지적되었지만, 실제 ESWL 장치의 효율성이 캐비테이션과 관련된다는 것을 확실히 조사·분석하기 위하여, 압전식 ESWL 장치 사용시 발생하는 캐비테이션 현상이 파쇄 효율에 어떤 영향을 미치는 지 실험적으로 조사한 결과를 제시한다. 본 연구에서 사용된 장치는 일본 Toshiba사에서 제작한 압전식 ESWL 장치(ECOLITH ESL 500-A)로서, 실제 판매되고 있는 제품보다는 파워 면에서 80%의 수준인 시험용 장비이다.

본 연구의 실험에서는, 공기함유량의 차가 뚜렷하다고 판단되는 두가지 매질로 나누어 실험한 후, 그 결과를 비교하는 방법을 사용한다. 이것은 캐비테이션 기포의 발생이 ESWL 장치 사용시 충격파의 매질이 되는 물 속의 공기함유량에 의존한다는 사실을 반영한 것이다. 따라서, 자체 제작한 탈기수 및 비탈기수를 충격파의 매질로 사용한다.

캐비테이션과 ESWL장치와의 상관성

캐비테이션은 다양한 이유로 발생되며, 그 중 한가지 이유로 설명되는 것이 음향적 자극(acoustic excitation)이다. 강한 음장이 액체 내에 발생할 경우, 기포가 만들어지면서 압력이 변동할 때, 캐비테이션은 낮은 압력이 생성되는 단계에 발생한다. 이 음향 캐비테이션 시기동안 강한 잡음이 발생하며, 이것은 기포가 발생하여, 진동으로 발전되는 과정에서 연유하는 것이다. 음장 내에서의 공동(cavity) 즉 캐비테이션 기포는 독특한 잡음원으로 작용할 뿐만 아니라, 부근에 있는 재질에 파괴적인 영향을 미치기도 한다. 이러한 기포의 공격적 활동은 응용면으로 유익하게 사용되기도 하지만, 원치않는 곳에서는 치명적인 결함이 될 수도 있다. 기포의 형성과 활동에 대해서 아직 충분한 연구결과를 얻지 못하고 있는 것은 사실이지만 추정되는 몇가지 가설은 존재하고 있다[14].

현재까지 ESWL 장치로 인한 캐비테이션과의 상관성에 관한 이론적인 가설로는 ESWL 장치로 충격파를 조사할 경우, 그 충격파로 인한 음향적 자극에 따라 캐비테이션 기포가 발생하여, 그 기포의 붕괴로 인한 힘이 ESWL 장치의 대상물에 미치게 되어 대상물이 파쇄된다는 것이고, 또 기포가 많이 발생되어 산재해 있는 환경에서는 그 기포가 초음파가 진행되는 경로에 이질적인 음향 임피던스로 작용하게 되어 오히려 힘을 약화시킬 가능성에 대해서도 논의되고 있는 실정이다.

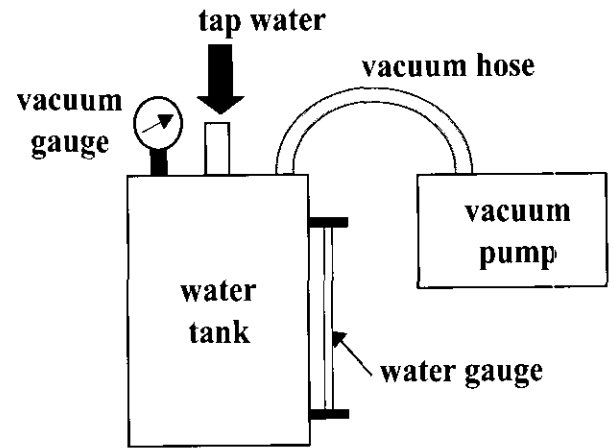


그림 1. 탈기수 제작을 위한 장치의 구성

Fig. 1. The configuration of degassing equipment

본 논문은 이들 가설에 포함되어있는 내용을 비롯한 몇가지 항목을 직접적인 실험을 통하여 조사하는 것을 목적으로 하고 있다.

1. 캐비테이션과 방사음과의 관계에 대한 조사

먼저, 수중에서 발생하는 캐비테이션 기포의 존재와 ESWL 장치를 사용할 때의 방사음과의 관계를 조사하기 위한 실험을 행한다. 전술한 바와 같이, 캐비테이션 발생은 매질의 공기함유량에 의존하므로, 캐비테이션 기포 발생율이 확실히 구분되는 두가지 매질로 비교·실험하기 위해서는 보통 급수되는 물보다 공기함유량이 낮은 매질을 만들 필요가 있다. 따라서 그런 매질을 만들기 위해 공기함유량을 낮추려면 물을 탈기시켜야 하므로, 본 연구에서는 탈기장치를 만들어서 탈기수를 직접 제작하였고, 이것을 실험의 매질로 사용한다. 여기에 사용된 탈기장치의 구성을 그림 1에 나타낸다.

탈기수의 제작과정을 간단히 설명하면, 40cmHg의 압력까지 장치중의 공기를 흡출하고, 그 압력을 그대로 유지한 상태에서 물을 3ℓ/min의 비율로 유입시켜 약 1시간에 걸쳐 180ℓ 정도의 물을 탈기하는 방법으로 제작된 탈기수이다.

(1) 실험방법

캐비테이션과 방사음과의 연관성을 조사하기 위한 실험방법을 간단히 설명하면, 위의 방법으로 만든 탈기수와 비탈기수(일반 수도물)를 각각 수조에 담아 매질로 사용하여, ESWL 장치로 충격파를 조사하면서, 각각의 매질에서 초점으로부터 들리는 방사음을 하이드로폰으로 측정하여 그 변화를 관측하는 방법을 사용한다.

먼저 하이드로폰을 수조 내의 일정한 위치에 설치한다. 이것은 매질만 다르고 그 외의 조건은 전부 동일하다는 전제를 위한 것이다. 이러한 동일 환경하에서, 충격파의 매질만을 바꾸어서 각각 500회의 충격파를 조사한다. 미리 설치해 둔 하이드로폰으로 충격파 조사와 함께 발생하는 방사음을 측정한다.

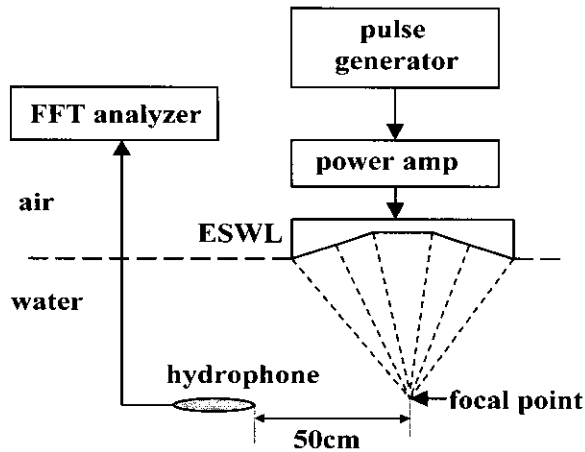


그림 2. 방사음에 대한 실험을 위한 구성도
 Fig. 2. The configuration of experimental setup for radiated sounds

이렇게 하이드로폰으로 측정된 방사음을 FFT 분석기(FFT analyzer)에 입력하여 그 스펙트럼을 분석한다. 본 실험에서는 방사음의 스펙트럼을 관측한 후, 20 kHz까지의 부분 파워(partial power)를 분석하는 데, 이것은 사람의 귀에 들릴 수 있는 가청주파수 내에서 ESWL 장치 방사음의 특성을 조사하기 위한 것이다. 이 때, 하이드로폰은 ESWL 장치의 초점에서 50cm 정도 떨어진 지점에, 초점 위치를 향하는 형태로 설치하였다. 설명한 것과 같은 본 장에서의 실험구성도를 그림 2에 나타낸다.

(2) 실험결과

위와 같은 방법으로 실험한 결과를 다음과 같이 제시한다. 그림 3은 각각 탈기수 및 비탈기수를 매질로 한 각각의 경우에 대하여, 충격파 조사회수에 따른 방사음의 파워 스펙트럼 중, 20 kHz까지의 부분 파워를 충격파 조사회수 20회 간격으로 FFT 분석기로 측정한 결과를 나타내고 있다. 그림 3의 결과를 간단히 요약하면, 탈기수를 매질로 한 경우가 비탈기수를 매질로 한 경우보다 충격파 조사시에 발생하는 방사음의 분산성이 더 작다는 것이다.

이것을 좀 더 면밀히 알기 위해 정량적으로 설명하면, 탈기수의 경우는 조사회수에 따른 방사음 부분 파워의 차가 최대 0.5 dB에 불과하지만, 탈기하지 않은 물에서는 최대 1.2 dB 이상의 차가 나타난다는 것이다. 물론, 요약하여 설명한 바와 같이 비탈기수가 매질인 경우가 탈기수의 경우보다 방사음의 파워 변화 폭이 훨씬 크게 발생한다는 정성적인 특성도 그림으로부터 분명히 확인할 수 있다. 이런 결과를 미루어 볼 때, 방사음 파워의 분산성이 작게 나타나는 쪽이 캐비테이션 현상의 발생률이 작은 탈기수의 경우인 점으로 귀결될 수 있으므로, 충격파가 조사되고 있는 상황에서 매질의 변화 등 상황에 따라 발생하는 상대적인 캐비테이션 발생율을 일정시간 방사음의 관측만으로도 비교·추정할 수 있다고 생각한다.

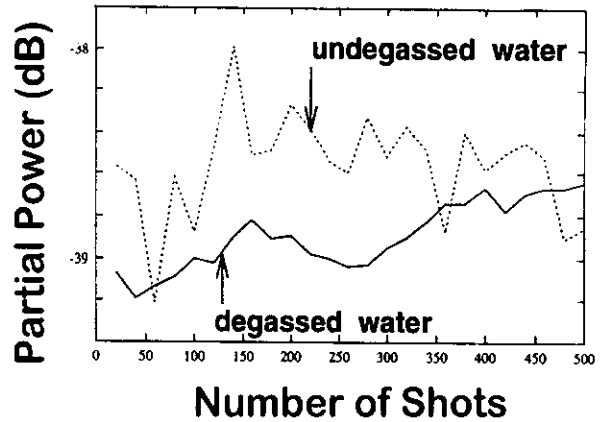


그림 3. 각 매질에서의 방사음의 부분 파워의 변화
 Fig. 3. The variation of the partial power for the radiated sounds in each medium

2. 캐비테이션과 파쇄효율과의 관계에 대한 조사

본 절에서는 ESWL 장치의 파쇄력과 캐비테이션과의 관계를 검토하기 위하여, 매질인 물의 탈기여부와 파쇄효율과의 상관성에 대하여 실험적으로 조사한다[11, 12]. 이 관계에 대해서는 Obara 등의 연구발표에서 캐비테이션 기포가 결석에 부착되어 발생하기 때문에, 캐비테이션 기포군이 결석파쇄 메카니즘에 관여하고 있는 것으로 추정하고 있다[12]. 또, Holmer 등은 결석 부근의 환경이 물과 같이 점성이 낮은 액체인 경우에만 캐비테이션 현상이 파쇄에 영향을 미친다는 내용의 연구결과를 발표하고 있다[13]. 그러나, 아직 캐비테이션과 파쇄효율과의 관계에 대하여, 실제 장치로 직접적인 파쇄실험을 수행하여 나타난 결과는 제시된 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 압전식 ESWL 장치에 의한 파쇄실험을 직접 행하여, 캐비테이션 기포

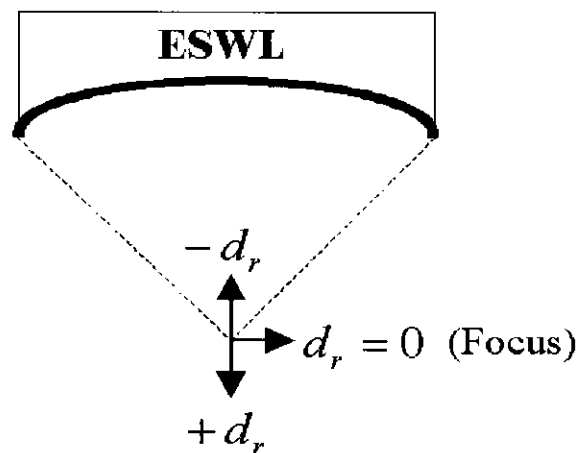


그림 4. ESWL 장치의 초점과 대상물 간의 상대적 위치를 나타내는 구성도
 Fig. 4. The relative positions of the object and the focus of piezoelectric ESWL

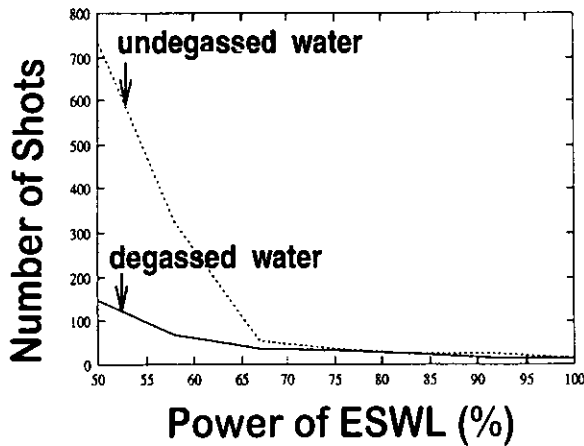


그림 5. ESWL 장치의 설정 파워에 따른 파쇄까지의 조사회수
Fig. 5. The number of shots to break due to the power of the ESWL

와 파쇄효율과의 관계를 조사하는 방법을 제안하며, 그 실험결과를 제시한다.

(1) 실험방법

여기서는 먼저 ESWL 장치의 파워에 따른 파쇄효율을 조사하고, 다음에 초점위치의 변동에 따른 파쇄효율 및 매질에 따른 초점 부근에서의 파워를 비교하는 실험을 행한다.

실험 대상물로는 6.2cm 의 초크를 사용하는 데, 그 이유는 초크의 음향 임피던스가 실제 결석과 거의 유사하기 때문이다. 또 실험을 위해서 대상물의 위치와 초점과의 기하학적인 관계를 나타내는 파라미터를 설정하는 데, 그 구성도를 그림 4에 표시한다. 그림 4에서, $d_r=0$ 은 ESWL 장치의 초점이 대상물의 중앙에 위치하는 것을 의미한다. 또, 여기서 음의 값은 대상물이 초점보다 ESWL 장치에 가까운 방향을 나타내며, 양의 값은 초점보다 ESWL 장치에서 멀어지는 방향을 의미한다.

먼저 ESWL 장치의 파워에 따른 파쇄효율 실험방법에 대하여 설명한다. 본 실험에서 사용된 Toshiba사의 압전식 ESWL 장치는 100% 파워가 82MPa로 설정되어 있다. 이와 같이 설정되어 있는 파워를 100%에서 50%까지 단계적으로 조정해 가면서, $d_r=0$ 에 위치하고 있는 대상물인 초크를 각각의 파워에 따라 파쇄하는 데, 파워의 설정값을 변동시킬 때 마다 초크가 파괴될 때 까지 조사된 충격파 회수를 기록하여 다른 파워에서의 값과 상호 비교하는 방법으로 두 가지 매질에 모두 적용한다.

다음에는 전술한 초점위치 설정 파라미터 d_r 에 따른 장치의 파쇄효율을 관측하는 실험방법을 설명한다. 이 실험은 $d_r=0$ 를 기준으로 하여 대상물에 있어서의 d_r 값을 $-4\sim+6$ mm 까지 변화시켜가면서, 전 실험과 마찬가지로 초크가 완전히 파괴되기 까지의 충격파 조사회수를 기록·비교하는 방법이다. 이 실험도 역시 두 가지 매질에서 동일하게 수행한다.

마지막으로, 매질의 탈기 유무에 따른 초점부근에서의 충격

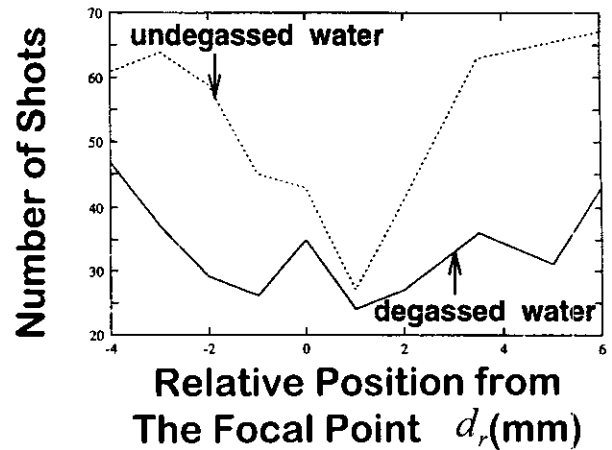


그림 6. 대상물 위의 초점위치에 따른 파쇄까지의 조사회수
Fig. 6. The number of shots to break due to the positions of the focus on the phantom

파의 파워를 직접 측정하는 실험을 행하였는 데, 본 실험에서는 각각의 매질 내에 충격파 계측용 특수 하이드로폰을 대상물 대신 초점위치에 설치한 후, d_r 값이 $-8\sim+8$ mm인 영역에서 1 mm간격으로 충격파를 계측한 결과를 디지털 오실로스코프로 관측하는 방법을 사용한다.

(2) 실험결과

그림 5는 ESWL 장치의 파워에 따른 실험의 결과인데, 세로축은 초크가 완전히 파괴되기까지, 즉 두 조각으로 부러지기 까지 조사한 충격파의 회수를 나타내고 있고, 가로축은 대상물의 파괴에 이용된 ESWL 장치의 상대적 설정 파워를 나타낸다. 그림 5를 분석해 보면, 약 70%의 파워까지는 탈기수에서나 비탈기수에서나 대상물이 파괴되기까지의 충격파 조사회수에 차이가 거의 없지만, 67%의 파워 이하에서는 비탈기수를 매질로 한 경우의 조사회수가 급속히 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이런 결과를 정리해 보면, ESWL 장치가 67% 이상의 파워로 설정되어 있을 때에는, ESWL 장치의 초점부근에 강한 충격파의 압력이 가해지므로, 탈기수의 경우나 비탈기수의 경우 모두 거의 같은 정도의 파워를 나타내고 있어, 탈기여부에 그다지 영향을 받지 않는다고 생각할 수 있지만, 67% 이하의 파워에서는 비탈기수를 매질로 한 경우가 탈기수를 매질로 한 경우보다 파쇄력이 떨어지고 있는 결과를 분명히 보이고 있으므로, 기본적인 존재수부터 충격파의 조사에 따른 발생을까지도 탈기수의 경우보다 높다고 추정되는 캐비테이션 기포의 영향이 비탈기수 매질 내에서 파쇄력이 감소하는 기본요인으로 생각할 수 있다.

그림 6는 전술한 파라미터 d_r 에 따른 장치의 파쇄효율을 관측한 실험결과이다. 세로축은 대상물이 파괴되기까지의 충격파 조사회수를 가리키고, 가로축은 대상물에 있어서의 초점의 위치 즉, d_r 을 표시하고 있다.

위에서 서술한 방법으로 실험한 결과, 초점이 대상물의 중앙

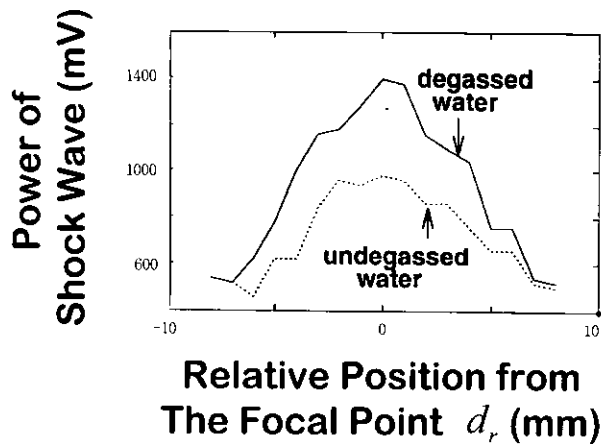


그림 7. 매질에 따른 초점 영역에서의 ESWL 파워의 비교
Fig. 7. The comparison of the ESWL power in the focal region due to the medium

에 위치할 때($d_r=0$)는 앞의 실험과 마찬가지로 대상물이 파쇄되기까지의 조사회수에는 탈기수에서나 비탈기수에서나 거의 차이가 없지만, 초점에서 3~4 mm 정도 어긋남에 따라 10~20 회 이상의 차가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 실험결과는, 실제 장치에서의 초점영역이 약 1 cm 정도인 점을 감안할 때, 캐비테이션 기포의 발생이 ESWL 장치의 파쇄효율에 영향을 미칠 요인으로 추정되는 점은 무시할 수 없는 결과이다.

또 위 실험결과를 보더라도, 캐비테이션의 영향으로 ESWL 장치의 파쇄효율이 떨어지고 있는 점을 확인할 수 있지만, 그 원인을 좀 더 근본적으로 규명하기 위하여, 매질의 탈기 유무에 따른 초점부근에서의 충격파의 파워를 특수 하이드로폰으로 직접 조사한 결과를 그림 7에 나타낸다. 그림 7은 초점의 위치에 따른 충격파의 진폭 변동을 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 전술한 파라미터 d_r 을 나타내고 있고, 세로축은 충격파의 파워를 특수 하이드로폰으로 직접 측정한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 점선 부분이 비탈기수를 매질로 한 경우를 표시한 것인데, 정확한 초점 즉, d_r 이 0인 점에서 최대의 차를 보이는 것을 기준으로 상하 약 6~7 mm까지는 실선 부분인 탈기수의 경우보다 파워가 감소해 있는 것을 분명히 확인할 수가 있다. 이 결과는 캐비테이션 기포의 존재수 및 발생율이 비탈기수보다 작은 탈기수를 매질이 되는 경우가 ESWL 장치의 파쇄효율면에서 상대적으로 앞선다는 점을 충분히 나타내고 있다.

결론 및 고찰

본 연구의 내용은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 먼저 충격파의 방사음을 계속해 본 결과, 충격파로 인한 방사음의 분산성은 공기의 함유량이 적은 경우, 즉 탈기수를 매질로 한 경우가 비탈기수의 경우보다 더 작게 나타나고 있다. 이와 같

은 결과에서 ESWL 장치를 사용할 때의 방사음을 분석하여 가청주파수 범위의 부분 파워에 대한 분산성을 조사하면, 어떤 상황을 기준으로 한 상대적 캐비테이션 발생율을 비교·추정 가능하다는 결론이다.

다음에, 일정한 파워 이상 즉, 본 연구에서의 ESWL 장치에서는 67% 이상의 파워에서는 거의 차이가 나타나지 않았지만, 그 이하의 파워에서는 비탈기수를 매질로 한 충격파의 파쇄력이 탈기수의 경우보다 감소하는 것으로 관측되었다. 따라서, 캐비테이션 발생이 적은 탈기수를 매질로 하는 경우가 비탈기수의 경우보다 파쇄효율면에서 좋다는 것을 확인할 수가 있다.

또한 탈기수 및 비탈기수를 매질로 하여, 각각의 매질에 조사된 충격파를 특수 하이드로폰으로 직접 측정한 결과에서도 초점 부근의 파워에서 탈기수의 경우가 분명히 크게 나타나는 점을 확인하였다. 이것은 ESWL 장치를 사용할 때 캐비테이션과 파쇄효율과의 상관관계를 충분히 예상할 수 있는 직접적인 실험결과이다.

본 연구에서의 결과들은, 실제 인체를 모델로 상정(想定) 즉, 인체의 내부를 매질로 한 경우와 직접 결부시키려면 여러 가지로 연구·보완되어야 할 점이 있겠지만, 현재로서도 상황에 따른 상대적인 캐비테이션의 발생율을 방사음으로 비교하는 방법 및 ESWL 장치를 사용하는 데 있어서 보다 파쇄효율을 높이는 운용방법에 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. P.T. Hunter, B. Finlayson, R.J. Hirko, W.C. Voreck, R. Walker, S. Walck, and M. Nasr, "Measurement of Shock Wave Pressures Used for Lithotripsy", J. Urology, Vol. 136, pp. 733~738, 1986
2. Ch. Chaussy, and E. Schmidt, "Shock Wave Treatment for Stones in the Upper Urinary Tract", The Urologic Clinics of North America, Vol. 10, No. 4, pp. 743~750, 1983
3. 高山和喜, 小野寺收, 小原哲郎, 嶋原正明, 北山修, "水中微小爆發による衝撃波フォーカシング醫療應用への基礎研究", 日本機械學會論文集(B編), Vol. 57, No. 539, pp. 2285~2292, 1991
4. H. Kanai, Y.S. Jang, N. Chubachi and Y. Tanahashi, "Power Difference in Spectrum of Sound Radiation before and after Break of Phantom by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, No. 5B, pp. 3159~3161, 1994
5. Y.S. Jang, T. Akasaka, M. Sato, H. Kanai and N. Chubachi, "Measurement and Analysis of Vibrations on Surface of Phantom Induced by Piezoelectric Extracorporeal Shock Wave Lithotripter", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, No. 5B, pp. 3163~3166, 1996
6. A.R. Williams, M. Delius, D.L. Miller, and Schwarze,

- “Investigation of Cavitation in Floating Media by Lithotripter Shock Waves Both In Vitro and In Vivo”*, *Ultrasound Med. and Biol.*, Vol. 15, 1989
7. A.J. Coleman, J. E. Saunders, L.A. Crum, and M. Dyson, *“Acoustic Cavitation Generated by an Extracorporeal Shock Wave Lithotripter”*, *Ultrasound in Med. and Biol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 69~76, 1978
 8. C.C. Church, *“A Theoretical Study of Cavitation Generated by an Extracorporeal Shock Wave Lithotripter”*, *J. Acoust. Soc. America*, Vol. 86, No. 1, pp. 215~227, 1989
 9. N. Sanada, J. Ikeuchi, K. Takayama, and O. Onodera, *“Interaction of an Air Bubble with a Shock Wave Generated by a Microexplosion in Water”*, *Proc. Int. Symp. on Cavitation*, pp. 67~72, 1986
 10. N. Ioritani, M. Kuwahara, K. Kambe, K. Taguchi, T. Saito, S. Shirai, S. Orikasa, K. Takayama, and P. A. Lush, *“Acoustic Cavitation Bubbles in the Kidney Induced by Focused Shock Waves”*, 17th Int. Sym. on Shock Waves and Shock Tubes, pp. 185~190, 1989
 11. 山崎卓, “キャビテーション工学”, 日刊工業新聞社, 1978
 12. 小原哲郎, “水中衝撃波フォーカシングの医療應用に関する基礎研究”, 日本東北大学博士論文, 1991
 13. N.G. Holmer, L.O. Almquist, T.G. Hertz, A. Holm, E. Lindstedt, H.W. Persson, and C.H. Hertz, *“On the Mechanism of Kidney Stone Disintegration by Acoustic Shock Waves”*, *Ultrasound Med. and Biol.*, Vol. 17, 1991
 14. Malcolm J. Crocker, *“Encyclopedia of Acoustics”*, John Wiley & Sons, 1997